1.5 드브로이의 물질파 가설

• 드브로이의 물질파 가설

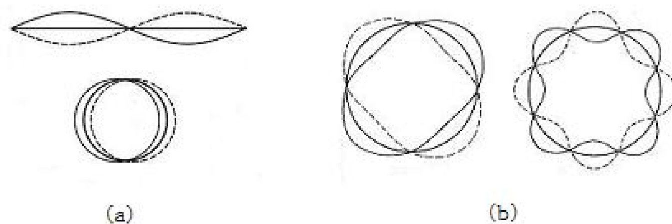
1924년 드브로이(L. de Broglie)는 물질파 가설(matter wave hypothesis)을 발표하였다. 그것은 질량이 없는 빛뿐만 아니라 질량이 있는 물질도 원래의 입자성에 더하여 파동성을 갖는다는 것이며, 물질파의 파장은 운동량과 다음과 같은 관계에 있다는 것이다.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \hbar k$$

여기서 p는 물체의 운동량(mv), h는 플랑크 상수, k는 파수(wave number)이며, 우리는 λ를 드브로이 파장(de Broglie wavelength)이라고 부른다. 우리는 앞에서 광전효과를 설명한 빛은 알갱이로 되어있다는 아인슈타인의 광자 가설이 1923년 콤프턴의 실험에 의하여 그 입자성이 확인될 때까지 다수의 물리학자들로부터 인정받지 못하였음을 들었다. 이는 앞에서 살펴본 영의 이중슬릿 간섭실험에서 분명하게 나타나는 빛의 파동성을 우리가 인정한다면, 그것과 명확하게 상반되는 빛의 입자성을 받아들이는 것이 그만큼 어려운 일임을 말해주고 있다고 하겠다. 하지만, 콤프턴의 실험에 의하여 적어도 빛의 경우에는 서로 상반되는 듯한 파동성과 입자성을 함께 가지고 있음을 모든 사람들이 인정하여야만 되었다. 드브로이는 콤프턴의 실험에 의하여 빛의 경우에 입증된 그러한 상반되는 물질과 파동의 특성이 함께하는 이중성을 빛뿐만 아니라 모든 물질들이 갖는다고 가정한 것이다.

드브로이의 물질파 가설은 아인슈타인의 광자 가설에서 일반화 시킬 수 있는데, 광자의 에너지 관계식을 다시 쓰면 $E = h\nu = \dfrac{hc}{\lambda}$ 이다. 여기서 빛의 경우($m = 0$)에 에너지가 아인슈타인의 특수상대성이론에서 $E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} = pc$ 로 주어지므로 우리는 $p = \dfrac{h}{\lambda}$, 즉 드브로이의 공식을 얻을 수 있다. 이러한 아인슈타인의 광자 가설에서 나타나는 운동량과 파장과의 관계식을 드브로이는 질량이 없는 빛의 경우에서 질량이 있는 일반적인 경우로 확장하여 운동량과 파장의 관계를 가정한 것이다.

이러한 물질파 가설을 보어의 수소원자 모형에 적용하면, 각운동량 양자화 가정 $mvr = n\hbar$에서 우리는 수소원자의 전자가 갖는 물질파의 파장이 $\lambda = \dfrac{h}{mv} = \dfrac{h}{n\hbar/r} = \dfrac{2\pi r}{n}$ 으로 주어짐을 볼 수 있다. 이는 보어 원자모형에서 안정적인 전자궤도의 둘레가 드브로이 파장의 정수배임을 말해 준다. 즉, 보어의 각운동량 양자화 가정은 원자 내 전자의 물질파동이 정상파의 조건을 만족하는 특수한 상태에 있음을 뜻함을 보여준다(그림4 참조).

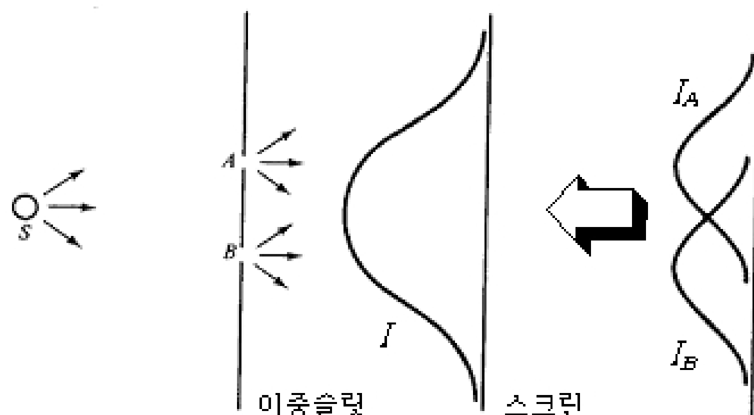


[그림4] (a) n=1인 경우의 정상파동과 원 궤도에서의 드브로이 정상파동
(b) n=2와 n=4인 경우의 원 궤도에서의 드브로이 정상파동

정상파는 파동이 진행하지 않고 동일한 파동 형태를 계속 유지한다는 점에서 안정적인 상태라고 할 수 있다. 여기서 궤도 둘레가 파장의 정수배가 아닐 경우, 정상파가 될 수 없고, 상쇄 간섭을 일으켜 안정적인 상태에 있을 수 없다는 점에서 보어의 가정이 뜻한 바를 이해할 수 있겠다. 하지만, 보어의 원자 모형은 왜 그러한 가정들이 필요한지에 대해서 설명할 수 없었기 때문에 여전히 다수 물리학자들을 설득시키지 못하고 있었다. 때문에 드브로이의 물질파 가설을 받아들이는 것은 대다수 물리학자들에게 매우 어려운 노릇이었다. 이러한 제안은 드브로이의 박사학위 논문이었는데, 때문에 그의 박사학위 지도교수 랑제방(P. Lengevin)은 이 논문을 아인슈타인에게 보내어 그 평을 구하였다. 이에 아인슈타인은 드브로이의 제안이 '낡은 것을 가리고 있던 장막의 한 자락을 젖혀 올린' 획기적인 제안이었다고 평했다고 한다. 드브로이의 물질파 가설은 1927년에 데이비슨(C. Davisson)과 거머(L. Germer)가 결정화된 닉켈 금속판에 전자빔을 쪼여 전자들이 드브로이 파장에 의한 회절(diffraction) 현상을 보임을 입증함으로써 인정받게 되었다.
드브로이의 물질파 가설은 모든 물질이 파동과 입자의 이중성(wave-particle duality)을 가짐을 뜻하며, 이는 양자역학의 근본적인 바탕이 되고 있다. 즉, 이 가설은 이후 슈뢰딩거(E. Schrödinger)에 의하여 물질파의 파동방정식이 써지고, 하이젠베르크(W. Heisenberg)에 의하여 불확정성 원리가 세워지면서 양자역학의 바탕 개념으로 역할하게 되었다.

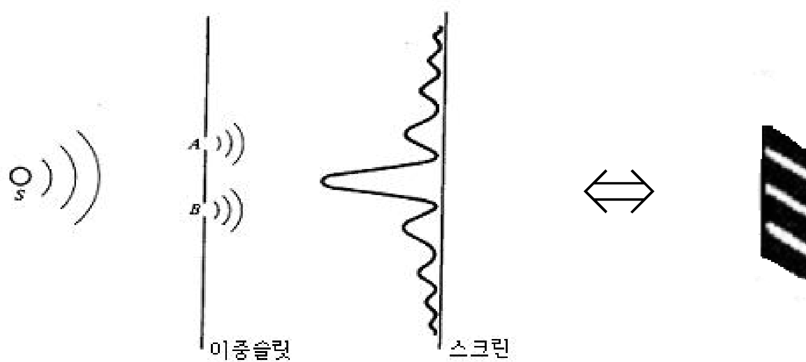
• 파동과 입자의 이중성

아인슈타인에 의한 광전효과의 설명이 영의 이중슬릿 간섭실험 이후 파동으로 알려져 온 빛이 입자성도 함께 가지고 있다는 빛의 파동과 입자의 이중성(wave-particle duality)을 확인한 것이었다면, 드브로이의 물질파 가설은 지금까지 전혀 파동의 특성을 가질 수 없다고 생각해왔던 모든 물질 역시 우리가 통상적으로 알고 있는 물질 본래의 입자성 뿐만 아니라 파동성도 함께 가지고 있다는 물질의 이중성을 주장한 것이다. 그리고 이미 언급한바 이러한 물질의 입자와 파동의 이중성(particle-wave duality)은 이후 실험으로 확인되었다.
우리는 이러한 이중성이 의미하는 바를 조금 더 정확하게 이해하기 위하여 먼저 입자성과 파동성 각각의 특성에 대하여 살펴보고, 파동-입자의 이중성이 어떠한 경우에 파동성이 구현되지 않고 입자성만 구현되는지 살펴보기로 하겠다.
먼저 [그림5]에서 표현된 입자성에 대해서 살펴보자.



[그림5] 입자의 이중슬릿 실험

우리가 입자라고 생각함은 어떤 슬릿으로 특정 입자가 통과하였는지 우리가 알 수 있음을 의미한다. 즉, A 슬릿을 통과한 입자들은 I_A 의 세기로 B 슬릿을 통과한 입자들은 I_B 의 세기로 스크린에 쌓일 것이며, 합해져서 전체 세기 I 를 준다. 즉, 전체세기는 $I = I_A + I_B$ 로 주어지며 스크린의 특정 영역에 입자들이 도달하지 않아 전체 세기가 0이 되는 간섭현상은 일어나지 않는다. 한편, 파동성은 [그림6]에 표현되어 있는데, 이 경우, 영의 이중슬릿 실험에서와 같이 스크린 상에 파동의 세기가 0이 되는 특정영역들이 나타나는 간섭현상이 일어난다. 이 경우, 우리는 파동이 전 공간으로 퍼져나가 두 개의 슬릿에 모두 도달하여 두 슬릿을 동시에 통과하였다고 생각한다.

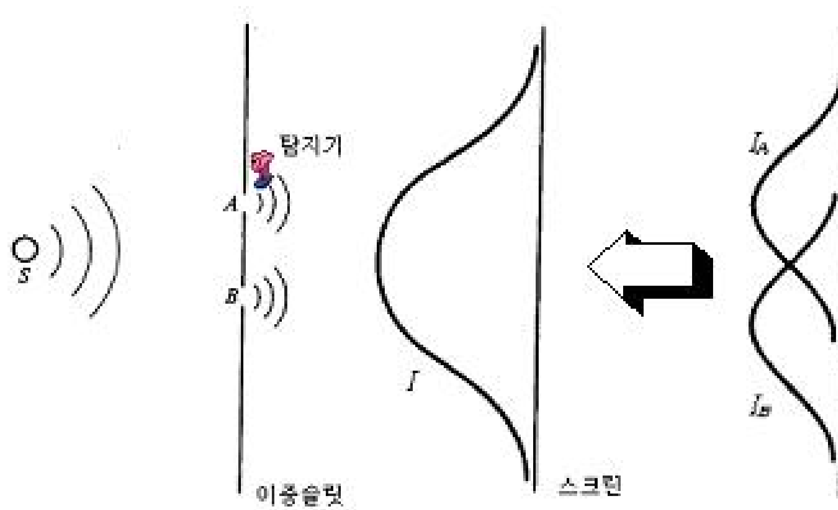


[그림6] 파동(물질파)의 이중슬릿 실험

파동의 경우 세기는 진폭의 절대값의 제곱으로 주어지며, 파동의 전체 진폭은 각 슬릿을 통과한 진폭들의 합으로 주어진다.
즉, $I = |\psi|^2$, $\psi = \psi_A + \psi_B$
여기서 각각의 진폭을 다음과 같이 복소함수들로 표현하면,
$\psi_A = |\psi_A| e^{i\delta_A}$, $\psi_B = |\psi_B| e^{i\delta_B}$,
전체 세기는 다음과 같이 주어져서 간섭효과를 보인다.
$I = |\psi_A + \psi_B|^2 = |\psi_A|^2 + |\psi_B|^2 + 2|\psi_A||\psi_B| \cos(\delta_A - \delta_B)$

여기서 빛의 경우에 파동-입자의 이중성에 대하여 생각해 보자. 우리는 빛의 세기를 아주 약하게 하면, CCD 카메라에서처럼 빛 입자가 하나씩 스크린에 도달하는 경우를 생각할 수 있다. 이 경우, 우리는 빛의 입자성을 본다고 할 수 있다. 그리고 슬릿을 하나씩만 열어 놓고 측정할 경우, 스크린에 [그림5]에서와 같은 세기를 얻는다. 그러나 두 개의 슬릿을 모두 열고 측정하면, 하나씩 하나씩 스크린에 쌓이는 빛 알갱이의 전체 분포는 [그림6]에서와 같은 간섭현상을 보이게 된다. 즉, 하나의 슬릿만 열고 하다가 나머지 하나의 슬릿을 여는 순간, 빛 알갱이 들은 스스로 알아서 스크린의 특정영역으로 가지 않게 되어서, 간섭 현상을 보이게 된다.
그렇다면, 입자가 어느 슬릿으로 통과했는지 이중 슬릿 뒤에 탐지기를 설치하여 측정하면

어떻게 될까? 이 경우는 [그림7]에 표현되어 있다.



[그림7] 파동(물질파)의 이중슬릿 실험 - 통과한 슬릿을 탐지기로 확인한 경우

신기하게도, 우리가 빛 알갱이가 어느 슬릿을 통과하였는지 탐지기로 측정하여 알게 되면, [그림6]에서 나타난 간섭무늬는 완전히 사라지고, [그림5]에서와 같이 슬릿을 하나씩만 열어 놓고 측정한 경우의 세기의 합으로 전체 세기가 주어짐을 볼 수 있다. 즉, 우리가 이중슬릿 상에서 빛 알갱이의 위치를 확인함으로써 우리가 빛의 입자성을 확인한 것이 되어 파동성은 나타나지 않게 된 것이다. 이러한 입자와 파동의 이중성은 빛의 경우에서만 아니라, 전자나 전자보다 2천배 정도 무거운 양성자 중성자뿐만 아니라(예컨대, 중성자의 파동성을 이용한 중성자 회절 실험은 물성의 특성을 파악하는데 있어서 X선 회절실험과 더불어 매우 중요한 실험방법의 하나이다.) 현재는 탄소원자 60개가 모여 이루어진 플러렌($C60$)을 가지고도 간섭실험이 성공되었다고 한다[주: 안톤 자일링거, “아인슈타인의 베일”].